doi:10.13866/j.azr.2018.05.03

新疆克里雅河上游主要离子化学特征及其成因分析①

邵跃杰[1,2]， 罗光明[3]， 王 建[4]， 颜 伟[4]， 刘景时[1]

（1. 中国科学院青藏高原研究所，北京 100101；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 新疆和田水文水资源勘测局，新疆 和田 848000；4. 盐城师范学院城市与规划学院，江苏 盐城 224007）

摘 要： 以克里雅流域上游河水为研究对象，收集克里雅站2004—2013年及部分20世纪90年代以前水文数据，结合气温、降水等资料，使用多元相关统计方法和水化学图示法等进行综合分析，揭示克里雅河河水的离子化学组成和变化特征，并探讨其影响因素。结果显示：① 克里雅河河水矿化度变化在203～1 081 mg·L^{-1}，平均值518 mg·L^{-1}，相对世界河流平均水平偏高；② 河水阳离子$Na^{+}+K^{+}$含量最高，主要阳离子浓度依次为($Na^{+}+K^{+}$)>Ca^{2+}>Mg^{2+}，河水阴离子以HCO_3^-为主，主要阴离子浓度依次为HCO_3^->SO_4^{2-}>Cl^-；③ 夏季河水离子浓度受流量控制最为明显，即流量越大（小），矿化度越小（大）；丰水期克里雅河河水以地表径流补给为主，枯水期河水几乎全部来自地下水，由于不同时期汇流路径的不同，河水离子浓度出现随流量的年内变化；④ 河水离子主要来源于岩石风化，其中蒸发岩的风化影响最大。

关键词： 水化学；离子浓度；年内变化；年际变化；主成分分析；克里雅河；新疆

雪冰融水是干旱区河流河水的主要来源之一，河水的化学组成是影响河水水质的重要因素。水体的化学特征一般受岩石风化、降水和蒸发浓缩等因素的影响，是多种因素综合作用的产物，所以，河流的水化学特征因特殊的气候和地质条件而具有独特性[1-3]。我国西北地区既有常年冰川覆盖的高山区，又有极端干旱的沙漠区，所以，认识寒区旱区河流水化学变化规律，有助于全面理解该区域的地球化学过程，同时也对水资源合理利用、水质评估以及环境保护都有重要意义。

近几年对水化学特征的研究日益受到重视，也取得了丰硕的成果[4-8]。对塔里木河流域研究发现，该流域各河流水化学组成均受岩石风化控制，河水离子主要来自蒸发岩[9-10]。武小波等[11]对黑河流域的研究发现，黑河上游水化学以碳酸盐风化影响为主，中游硫酸盐、岩盐占比逐渐升高，下游最终发展到以硫酸盐为主，同时蒸发浓缩作用使得河水矿化度达到最高值。水体化学组成的研究是揭示全流域地球化学循环的重要途径，如Wang等[12]通过对关中盆地地下水化学特征的研究，并结合水动力场分析，揭示了关中盆地地下水水文化学演化过程。干旱区河流是该区域经济和生活的生命线，近年来对水安全关注度增强，Duan等[13]评估了西安地区浅层地下水各有毒物质对人体建康风险的影响，其中以砷和硝酸盐的影响最大。李小玉等[14]对民勤地下水的研究表明，耕地增加和地下水超采严重，使得耕地地下水矿化度增大，造成耕地生产力下降，形成耕地增加和耕地生产力下降的恶性循环。

现有对干旱区河流水化学研究多关注河流的中下游平原地区，对上游河水研究相对较少，同时缺乏对长期水化学资料的分析。本文以西昆仑山北坡克里雅河为研究对象，利用统计分析和图表描述分析了克里雅河河水年内和年际变化，通过Gibbs图和主成分分析等方法，探究克里雅河水化学的控制因素以及可能的来源；基于相关分析法分析了克里雅河主要离子浓度与流量之间的关系，并结合水动力场探讨造成这种相关的原因。

1 研究区概况

研究区位于新疆和田克里雅水文站上游(35°10′～39°36′N，81°6′～82°55′E)，如图1所示，其流域形状近似三角形。1957—2014年克里雅站

① 收稿日期：2018-01-22； 修订日期：2018-05-23
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项(XDB03000000)；国家自然科学基金面上项目(41471060)资助
作者简介：邵跃杰(1991-)，男，汉族，硕士研究生，主要从事水文水资源的研究. E-mail：yuejieshao@163.com
通讯作者：刘景时. E-mail：jsliu@itpcas.ac.cn

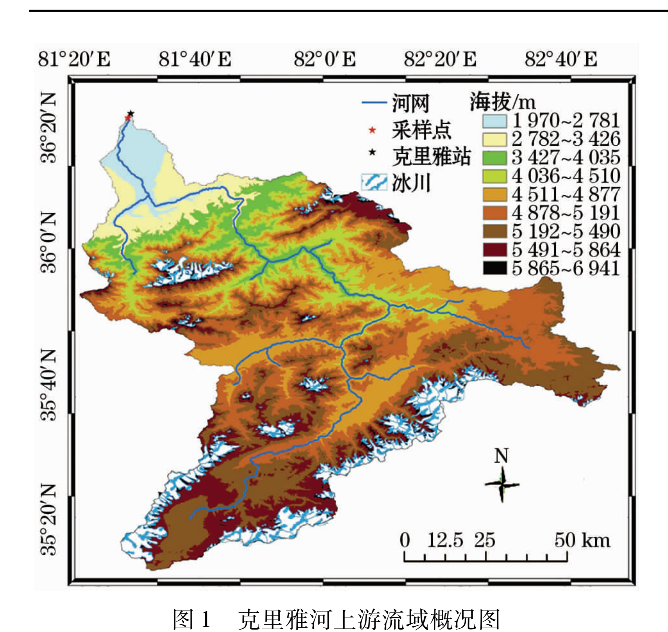


图 1 克里雅河上游流域概况图

Fig. 1 Overview map of upper reaches of the Keriya River Basin

点地区平均气温 10.3 ℃,7 月气温最高,平均 22.1 ℃,1 月气温最低,平均 -7.3 ℃;1957—2014 年平均降水量 129.7 mm,年内降水量变化幅度很大,单日或单月降水会遭遇强降雨,降水量在不同月份分布不均,5—7 月的降水量占全年降水量的 62%,1 月降水最少,月平均降水不足 1 mm;1986—2014 年站点地区年平均蒸发量(Φ20)为 1 922 mm,且蒸发主要集中在 4—9 月,其年内波动较大,年际变化稳定。

克里雅河是昆仑山北坡众多河流中仅次于和田河的第二大河,自昆仑山北麓向南延伸至塔克拉玛干沙漠腹地,全长约 530 km,平均坡降0.92%,流域集水面积 8 347 km^3,流域内最高峰海拔 6 962 m。海拔 5 500 m 以上的区域发育大量冰川;3 000 ~ 5 000 m 区域为中山带,会随着年内气温变化形成季节性积雪,是主要的降水区和产流区;2 000 ~ 3 000 m 区域为低山丘陵地带,该区被黄土堆积物覆盖,黄土厚度随海拔降低而逐渐增加,可达数米至三十几米,其成分与现代大气尘埃和沙漠流沙相似,黄土源区为塔里木盆地;河流到达海拔1 500 m 左右形成的冲积平原是主要的绿洲灌溉区,河水穿过于田绿洲,最终流入塔克拉玛干沙漠消失。

2 材料与方法

本文采用资料如下:① 水化学数据:1959 年、1979—1984 年、2004—2013 年的水化学数据;② 1957—2014 年的气温、降水、流量数据,1986—2014 年的蒸发数据。其中 2004—2013 年的数据具有较好的连续性,每年均包含 6 个月的观测数据,分别对应几个主要水文时期:春(3 月)、春汛(5 月)、夏汛(7—8 月)、秋(9 月)、冬(11 月)。气温、降水、蒸发数据均取自克里雅站(36°27′N,81°28′E),流量数据在克里雅站上游 1 km 处的水文断面测量。

进行水化学测试的样品同样在该断面定点采集,水样采集后先用滤纸过滤泥沙并封存于水样瓶,送至和田水文勘测局水化室进行测试,主要测试项目有 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^- 以及矿化度和 pH 值。样品 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用酚酞和甲基橙双指示剂滴定法测定,Cl^- 使用 $AgNO_3$ 标准溶液沉淀法滴定,SO_4^{2-} 通过 $BaCl_2$ 标准溶液测定,并用 EDTA 间接络合,Ca^{2+}、Mg^{2+} 用 EDTA 二钠盐标准溶液法测定。K^+ 和 Na^+ 根据离子平衡通过差减法算出,一般认为 Na^+ 浓度是 K^+ 的 5 倍,所以 $K^+ + Na^+$ 分子量选用 25 g · mol^{-1} 计算。总溶解固体(TDS)为 8 种主要离子浓度之和,由于测得的 CO_3^{2-} 浓度相对很小,部分月份的含量低于检出限,故分析过程中把 CO_3^{2-} 并入 HCO_3^- 作为一组数据进行分析。

3 结果与讨论

通过对 2004—2013 年特定月份克里雅河水化学数据进行统计分析(表 1)可知,主要阳离子中,$Na^+ + K^+$ 含量最高(19.5 ~ 196.5 mg · L^{-1}),平均为 95.7 mg · L^{-1},Ca^{2+} 浓度次之(21.6 ~ 60.1 mg · L^{-1}),Mg^{2+} 浓度最低(3.2 ~ 117.0 mg · L^{-1}),平均

表 1 克里雅河主要离子浓度

Tab. 1 Main ion concentrations in water of the Keriya River /(mg · L^{-1})

离子	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS	硬度	pH
平均值	95.7	37.7	24.7	89.9	90.1	198.5	518.8	195.6	8.3
最小值	19.5	21.6	3.2	17.7	17.5	104.0	203.0	100.3	8.0
最大值	196.5	60.1	117.0	194.0	446.0	291.0	1 081.0	281.7	8.6

值分别为 37.7 mg · L^{-1}和 24.7 mg · L^{-1}；主要阴离子中，HCO_3^- 的浓度最高(104 ~ 291 mg · L^{-1})，平均为 198.5 mg · L^{-1}，SO_4^{2-} 和 Cl^-的变化范围较大，分别为 17.5 ~ 446 mg · L^{-1}和 17.1 ~ 194 mg · L^{-1}，SO_4^{2-} 的平均浓度 90.1 mg · L^{-1}略高于 Cl^- 的平均浓度 89.9 mg · L^{-1}。克里雅河矿化度介于 203 ~ 1 081 mg · L^{-1}，平均 550.5mg · L^{-1}，高于全球范围内河水矿化度的总体水平(29 ~ 216 mg · L^{-1}，平均值 115 mg · L^{-1})[15]。河水 pH 在 8.0 ~ 8.6，高于大多数河水的 pH，因此，克里雅河水为偏碱性高矿化度河水。根据阿列金分类方法，水的类型为〔C〕Na Ⅱ型河水。

Gibbs 图是一种半对数坐标图，纵坐标用对数刻度表示 TDS，横坐标可用阳离子 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$浓度比或者阴离子 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$浓度比表示，通过 Gibbs 图可以判断河流水化学组成的控制因素[1]。数据分析过程中，将数据按采集日期分为 3 个时期，分别为枯水期(10 月至次年 4 月)、平水期(5—6、9 月)、丰水期(7—8 月)，由于测得的原始数据中没有 Na^+ 浓度，本文采用阴离子 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$来说明克里雅河的情况(图 2)。克里雅河水化学矿化度较高，阴离子 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$比值均在 0.5 以下，平水期和丰水期河水离子化学特征归属于“岩石风化型”，从而推测平水期和丰水期河水离子主要来源于径流冲刷造成的岩石风化，冬季枯水期河水矿化度最高，河水离子化学特征受蒸发作用的影响明显，在冬季径流形成过程中，产流稀少，同时由于显著的地表径流蒸发作用，使得枯水期蒸发结晶成为克里雅河水化学组成的重要控制因素。

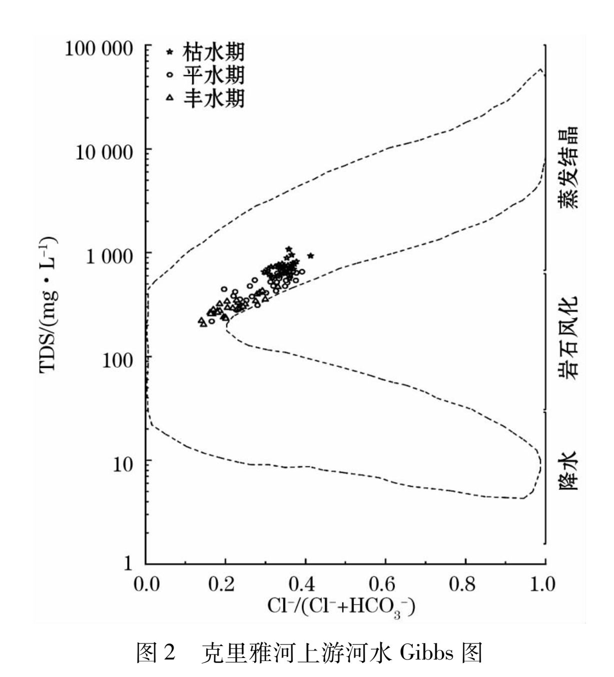


图 2 克里雅河上游河水 Gibbs 图

Fig. 2 Gibbs diagram of upper reaches of the Keriya River

3.1 主要离子浓度年内变化

先将 1959—2014 年所有数据按月份分组，再统计各月平均值，可以得到图 3 所示主要离子浓度、TDS 及硬度的年内变化图。由图 3 可知，年内克里雅河主要离子浓度与流量具有负相关关系，即流量增大，离子浓度减小；反之，流量减小，离子浓度增大，各离子浓度在夏汛期间(7—8 月)最低，冬季枯水期(11 月至次年 2 月)最高。夏季随着气温的升高，高海拔地区雪冰融水形成的径流增多，低矿化度的雪冰融水对河水的稀释作用显著增强，使河水离子浓度下降；同时，由于径流增多，流量和流速均加大，使得河水与岩床的接触时间减少，从而减弱了河水对岩石的溶解量，这也是造成河水离子浓度减小的原因之一。变异系数可以衡量一组数据离散程度，本研究用变异系数来分析不同离子年内的变化幅度。克里雅河 $K^+ + Na^+$、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^- 的变异系数分别为 43.9%、14.9%、39.6%、43.5%、39.3% 和 26.7%，其中 $K^+ + Na^+$、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 的变异系数约为 40%，而 Ca^{2+}、HCO_3^- 的变异系数均较低，这是由于克里雅河 pH 较高，在偏碱性的环境下，HCO_3^- 离子电离出的 CO_3^{2-} 增多，CO_3^{2-} 和 Ca^{2+}结合形成 $CaCO_3$ 沉淀，使得克里雅河 Ca^{2+}和 HCO_3^- 的变化幅度小于其他离子。

Piper 三线图是一种常用的水化学图示法[16]，可以直观了解水化学组成情况。如图 4 所示，将年内河水分为 3 个时间段，可以直观分析丰水期、平水期和枯水期的水化学组成差异。整体上看，夏季汛期各组阳离子相对浓度均小于 50%，依次为 $Ca^{2+} > K^+ + Na^+ > Mg^{2+}$，这个时期 HCO_3^- 占绝对优势，高达 60%，Cl^-和 SO_4^{2-} 各占大约 20%；图中平水期各点分散，分布特征不明显，这在阳离子图中尤其明显，这体现了在枯水和丰水的过渡时期内，河水受多种因素影响且没有一个因素能主导水化学组成；枯水期 $K^+ + Na^+$是水体中的主要阳离子，相对浓度超过 50%，最高可达 63%，Mg^{2+}相对浓度约为 25%，Ca^{2+}相对浓度约为 20%，枯水期主要阴离子含量依次为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$，相对浓度分别在 45%、35% 和 20% 左右，从图 4 的菱形区域可以看出，丰

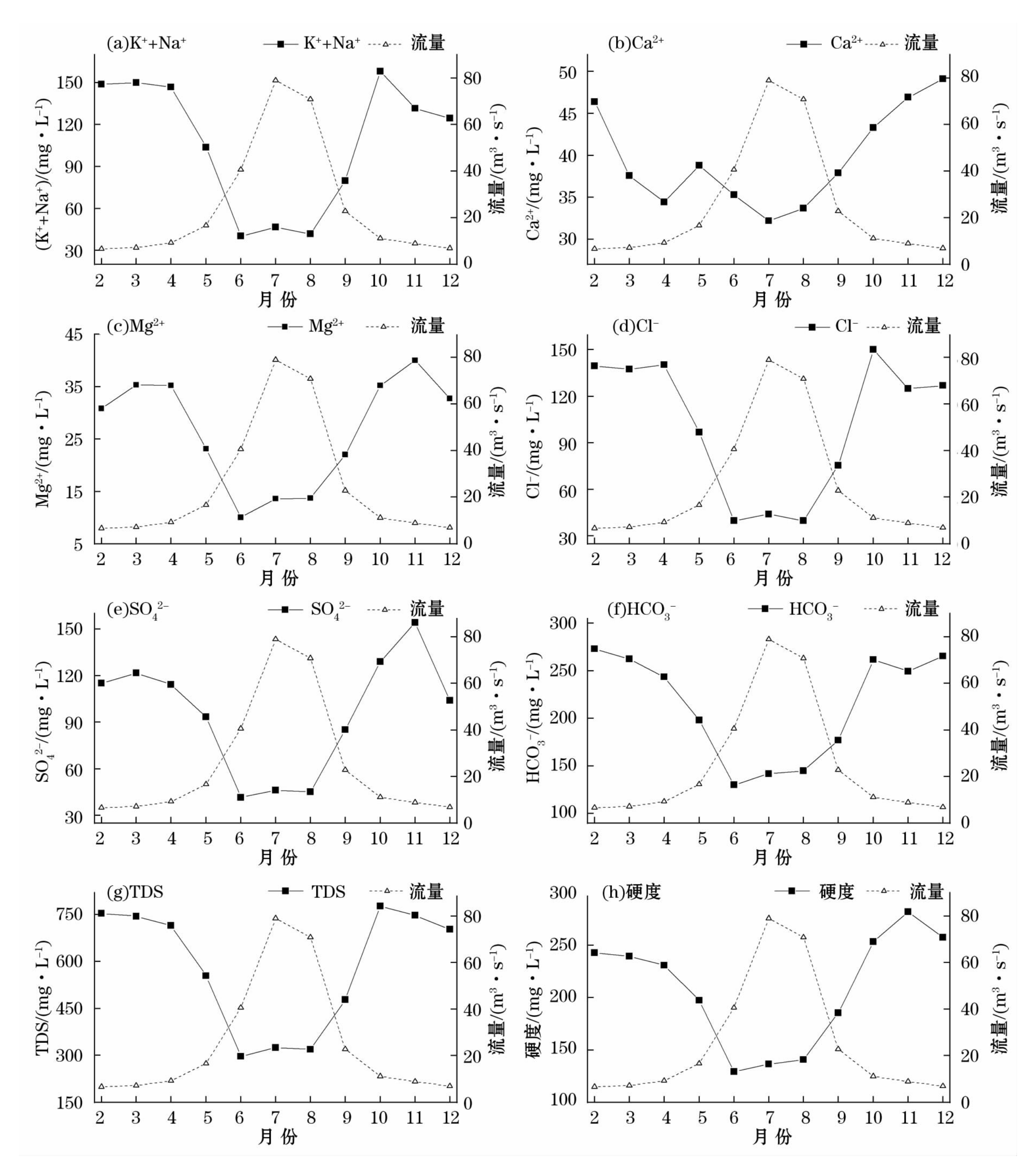


图 3 克里雅河主要离子浓度年内变化

Fig. 3 Annual variation of the concentrations of main ions in water of the Keriya River

水期河水的类型为 Ca-Mg-HCO_3 型，枯水期河水类型为 Na-Cl 型，平水期处于过渡阶段，河水化学类型也介于两者之间。

3.2 主要离子浓度年际变化

对克里雅河 2004—2013 年每年 6 个月（3、5、7—9、11 月）的数据作年内平均，得到克里雅河主要离子的年际变化图（图 5）。整体上，主要离子浓度与河水流量仍具有一定的负相关关系，但离子的浓度并非完全受控于流量，如 2006 年，从河水流量来看是平水年，Mg^{2+}、SO_4^{2-} 和矿化度却表现为历年最大值，2004 年、2008 年和 2009 年河水流量均相对较低，但一些离子的浓度在这些年份并不高，这表明克里雅河水的年际变化影响因素较多，由于年内河水流量波动很大，流量最大月份是最小月份的 13.3 倍，而年际流量波动相对较小，所以，降水和蒸发等因素的影响可能被放大，使得河水离子浓度年际变化规律更加复杂。

2004—2014年水体各离子的变化趋势分析表

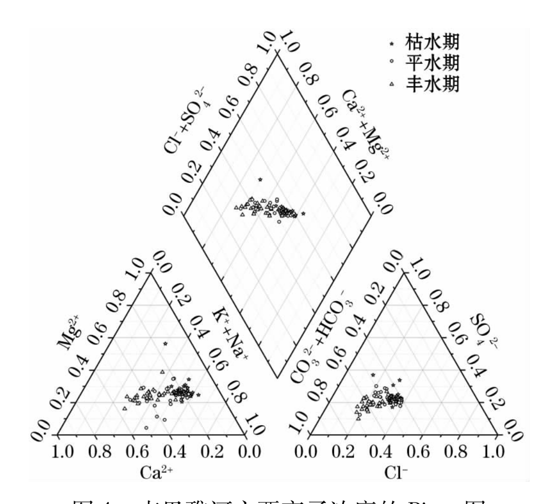


图 4 克里雅河主要离子浓度的 Piper 图

Fig. 4 Piper diagram of the concentrations of main ions in water of the Keriya River

明,$K^+ + Na^+$、Mg^{2+}、Cl^-、HCO_3^- 的离子浓度和矿化度均有下降趋势。Ling 等[17]研究表明,自 1957 年以来,流域年平均气温以 0.32 ℃·$(10a)^{-1}$的速率显著升高,年径流总量和降水量分别以 0.25×10^8 $m^3\cdot(10a)^{-1}$和 0.924 mm·$(10a)^{-1}$的速率呈不显著的上升趋势,并预测这种趋势在未来 50 a 内仍可能持续。流量是影响克里雅河水离子浓度的重要因素,因此,造成离子浓度降低的主要原因可能是这 10 a 河水年均流量的增大,这与 Ling 等的研究结果一致。

3.3 离子浓度与流量的相关分析

分析表明河水离子浓度与流量存在很强的相关性,因此使用拟合分析探究离子浓度和流量之间的关系,分别使用不同函数对数据进行拟合,结果表明,幂函数拟合效果最好(图 6)。如图 6 所示,用幂函数对阳离子 $K^+ + Na^+$、Mg^{2+},阴离子 SO_4^{2-}、Cl^-、HCO_3^- 以及离子总量与流量进行拟合,相关性都很明显。$K^+ + Na^+$和 Cl^-拟合方程自变量的幂极为接近,分别为 -0.50 和 -0.49,这表明 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^-可能具有相似的溶解过程,氯化物矿物的溶解对 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 的贡献最大,同样,Mg^2+ 和 SO_4^{2-} 拟合方程的幂分别为 -0.34 和 -0.37,表明二者的溶解过程也很相似,推测 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 受含镁硫酸盐的影响最大。各离子拟合方程的幂绝对值均小于 1,因此,汛期河水不仅受到稀释作用的影响,由于汛期内的蒸发作用强烈,水分蒸发同样使河水离子浓度升高。在枯水期流量较低,幂函数拟合并不符合图 6 中点的分布规律,主要有两个方面的原因:① 河水水量变少,导致河水对基岩的溶解能力逐渐达到饱和,矿化度不再升高;② 这个时期河水受地下水补给,水文站附近地下水的矿化度在 1 113mg·L^{-1}左右[18]。所以,在流量逐渐减小的情况下,河水的矿化度最终趋于一个定值。幂函数拟合在高流量时效果较好,而在低流量时,幂函数拟合与地区水文情况相差很大,因此,径流与矿化度之间的关系需要进一步的研究。

3.4 离子来源因子分析

为进一步探讨克里雅河水主要离子来源,深入了解克里雅河水化学过程,使用因子分析法对数据进行分析,按公共因子累积方差大于 90% 的条件筛选,如表 2 得到 3 个主要的公共因子,第一因子与 $K^+ + Na^+$、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、$CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 均有较强的相关性,与 Ca^{2+} 较弱,第二因子与 Ca^{2+} 有强相关性,第三因子与 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 有较弱的相关性。表 3 表明,3 个主要因子累计方差占 98%,其中第一因子 46.3%,第二因子 33.1%,第三因子 18.7%。

在天然条件下,蒸发岩的溶解对 $K^+ + Na^+$、Mg^{2+}、Cl^- 有重大贡献,而碳酸盐(方解石、白云石等)溶解风化则是 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的最大来源,第一个因子与 K^+、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^- 均有较强相关性,表明蒸发岩风化对克里雅河影响最大;第二个因子表明,碳酸盐的溶解也起到了重要作用,碳酸盐对 Ca^{2+} 的贡献率达到 84%,是控制河水中 Ca^{2+} 的主要因素。

表 2 克里雅河水主要离子浓度因子分析

Tab. 2 Analyzed results of the factors affecting the concentrations of main ions inwaterof the Keriya River

离子	因子 1	因子 2	因子 3
$K^+ + Na^+$	0.94	–	–
Ca^{2+}	0.55	0.84	–
Mg^{2+}	0.88	–	0.42
Cl^-	0.95	–	–
SO_4^{2-}	0.87	–	0.48
$CO_3^{2-} + HCO_3^-$	0.94	–	–

注:采用最大正交旋转法,<0.3 者不显示。

表 3 克里雅河水离子浓度方差累积量

Tab. 3 Cumulative variances of the concentrations of main ions in water ofthe Keriya River

因子	特征值	方差百分比/%	累积/%
1	4.47	46.26	46.26
2	0.78	33.12	79.38
3	0.63	18.65	98.02

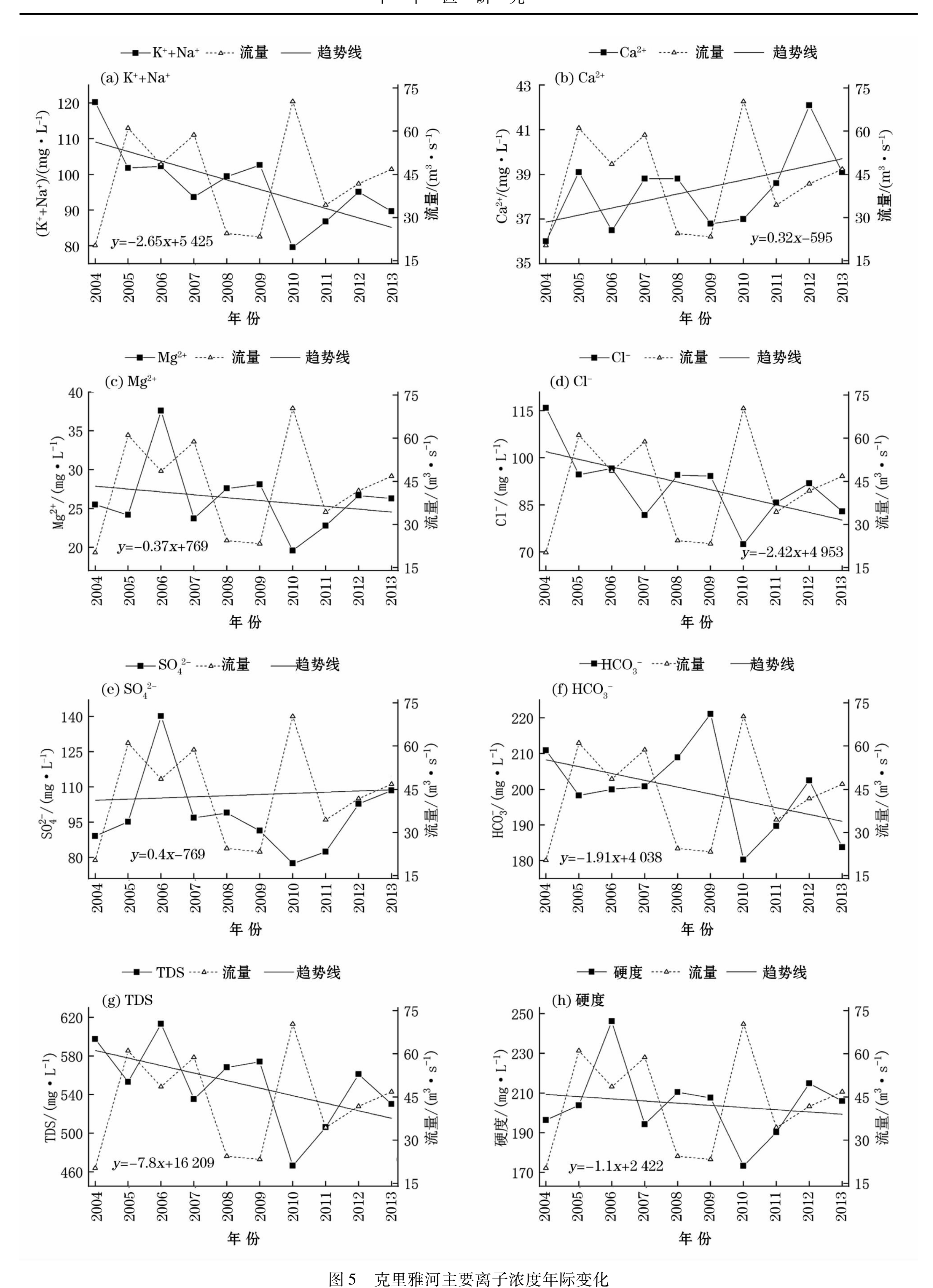


图5 克里雅河主要离子浓度年际变化

Fig. 5 Interannual variation of the concentrations of main ions in water of the Keriya River

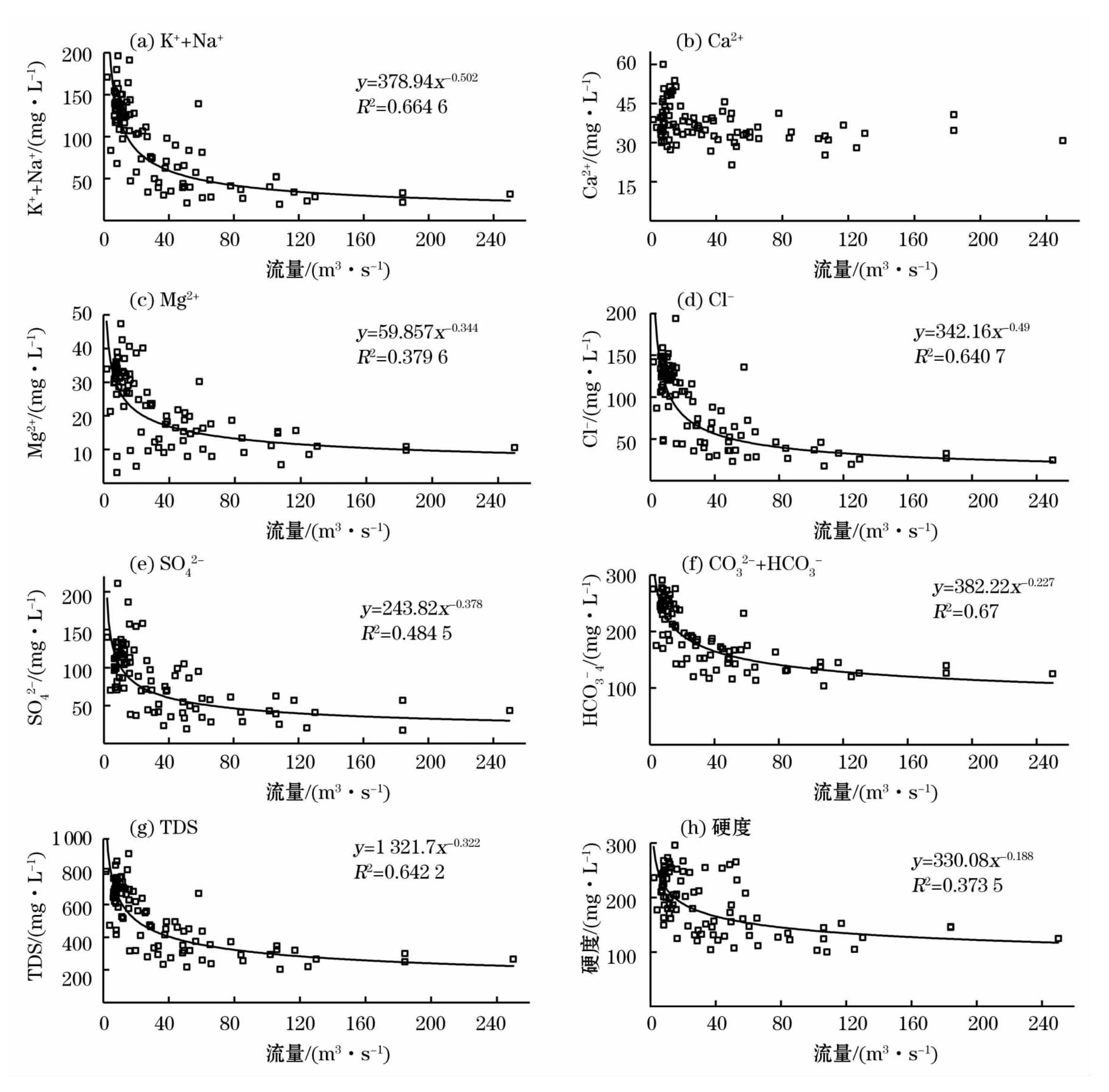


图6　克里雅河主要离子浓度与径流的关系

Fig. 6　Relationship between the concentrations of main ions and the runoff of the Keriya River

3.5　水动力场对河水水化学组成的影响

克里雅河上游山区和中游山前平原被深大断裂隔断,山区地下水很难通过地下径流流入山前平原,而是通过汇入河水的方式进入山前平原,采样点位于河道出山口,因此克里雅站数据能较好反映出上游昆仑山区的河水和地下水水文特征。克里雅河上游昆仑山山区经过多次构造运动,岩层机械破碎严重,因此,构造裂隙是山区地下水的主要存储区域和转移途径。雪冰固态水体矿化度一般介于 3.9 ~ 22.4 mg · L^{-1} 之间[19],因此,克里雅河水化学组成随流量的年内变化,受到不同时期融水汇流过程中不同路径的影响。丰水期温度升高,由于山区储水层厚度不高并且土壤含水量低,大部分融水通过超渗产流的方式形成地表径流直接汇入河道,这个过程对基岩的溶解效率远远低于地下水汇流过程,因此,这个时期河水的水化学组成分为两个部分,分别为占比较高的地表径流和占比较低的地下径流汇入,地下径流在融水较大的时期逐渐达到饱和,因此,这个时期随着融水量的加大,地表径流对地下径流的稀释作用明显。而在枯水期,上游山区雪冰在低温情况下很难形成地表径流,因此,河水主要受到地下基岩裂隙水补给,这个时期的河水均经过地下途径汇流,淋溶作用充分,所以河水矿化度最高;枯水期 K^+ + Na^+ 摩尔浓度百分比升高,Ca^{2+}、Mg^{2+} 摩尔浓度百分比降低,这是地下径流受到阳离子交替吸附作用的影响,水中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 被 K^+、Na^+ 交换出来,这也是枯水期河水主要受地下水补给的重要依据。

4 结 论

(1) 克里雅河主要离子组成中,阳离子浓度依次为:$K^+ + Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$,平均浓度分别为95.68 mg·L^{-1}、37.64 mg·L^{-1}、24.68 mg·L^{-1},阴离子 $HCO_3^- > Cl^- \approx SO_4^{2-}$,平均浓度分别为198.46 mg·L^{-1}、89.94 mg·L^{-1}、90.04 mg·L^{-1},TDS平均值518.8 mg·L^{-1}。

(2) 克里雅河水离子浓度受流量控制最为明显,存在明显的年内变化。从多年离子浓度变化趋势来分析,克里雅河水主要离子浓度呈下降趋势,佐证了克里雅河多年来水流量增大的观点。

(3) 克里雅河水离子来源主要受岩石风化作用的影响,其中蒸发岩影响最为重要,对各个离子均有较大贡献,碳酸盐对 Ca^{2+} 贡献很大,是 Ca^{2+} 的主要来源。

(4) 地下水动力场通过控制河水流动路径控制河水化学组成,丰水期克里雅河河水以地表径流补给为主,枯水期河水几乎全部来自地下水,由于不同时期汇流路径的不同,河水离子浓度出现随流量的年内变化。

参考文献(References):

〔1〕 Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry〔J〕. Science,1970,170(3 962):1 088 –1 090.

〔2〕 Kilham P. Mechanisms controlling the chemical composition of lakes and rivers:Data from Africa〔J〕. Limnol Oceanogr,1990,35(1):80 –83.

〔3〕 Feth J H,Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry:Evaporation-crystallization process〔J〕. Science,1971,172(3 985):870 –872.

〔4〕 李承鼎,康世昌,刘勇勤,等. 西藏湖泊水体中主要离子分布特征及其对区域气候变化的响应〔J〕. 湖泊科学,2016,28(4):743 –754.〔Li Chengding,Kang Shichang,Liu Yongqin,et al. Distribution of major ions in waters and their response to regional climatic change in Tibetan lakes〔J〕. Journal of Lake Sciences,2016,28(4):743 –754.〕

〔5〕 郑绵平,刘喜方. 青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征〔J〕. 地质学报,2010,84(11):1 585 –1 600.〔Zheng Mianping,Liu Xifang. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau,China〔J〕. Acta Geologica Sinica,2010,84(11):1 585 –1 600.〕

〔6〕 王鹏,尚英男,沈立成,等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化〔J〕. 环境科学,2013,34(3):874 –881.〔Wang Peng,Shang Yingnan,Shen Licheng,et al. Characteristics and evolution of hydrochemical compositions of freshwater lake in Tibetan Plateau〔J〕. Environmental Science,2013,34(3):874 –881.〕

〔7〕 王君波,朱立平,鞠建廷,等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究〔J〕. 地理科学,2009,29(2):288 –293.〔Wang Junbo,Zhu Liping,Ju Jianting,et al. Water chemistry of eastern Nam Lake Area and inflowing rivers in Tibet〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2009,29(2):288 –293.〕

〔8〕 高坛光,康世昌,张强弓,等. 青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源〔J〕. 环境科学,2008,29(11):3 009 –3 016.〔Gao Tanguang,Kang Shichang,Zhang Qianggong,et al. Major ionic features and their sources in the Nam Co Basin over the Tibetan Plateau〔J〕. Environmental Science,2008,29(11):3 009 –3 016.〕

〔9〕 肖捷颖,赵品,李卫红. 塔里木河流域地表水水化学空间特征及控制因素研究〔J〕. 干旱区地理,2016,39(1):33 –40.〔Xiao Jieying,Zhao Pin,Li Weihong. Spatial characteristic and controlling factors of surface water hydrochemistry in the Tarim River Basin〔J〕. Arid Land Geography,2016,39(1):33 –40.〕

〔10〕 王建,韩海东,赵求东,等. 塔里木河流域水化学组成分布特征〔J〕. 干旱区研究,2013,30(1):10 –15.〔Wang Jian,Han Haidong,Zhao Qiudong,et al. Study on hydrochemical components of river water in the Tarim River Basin,Xinjiang,China〔J〕. Arid Land Geography,2013,30(1):10 –15.〕

〔11〕 武小波,李全莲,贺建桥,等. 黑河上游夏半年河水化学组成及年内过程〔J〕. 中国沙漠,2008,28(6):1 190 –1 196.〔Wu Xiaobo,Li Quanlian,He Jianqiao,et al. Hydrochemical characteristics and inner-year process of upper Heihe river in summer half year〔J〕. Journal of Desert Research,2008,28(6):1 190 –1 196.〕

〔12〕 Wang W,Duan L,Yang X,et al. Shallow groundwater hydro-chemical evolution and simulation with special focus on Guanzhong Basin,China〔J〕. Environmental Engineering & Management Journal,2013,12(7):1 447 –1 455.

〔13〕 Duan L,Sun Y Q,Wang W K. Assessment of Regional Groundwater Quality Based on Health Risk in Xi'an Region,PR China〔J〕. Asian Journal of Chemistry,2014,26(7):1 951 –1 956.

〔14〕 李小玉,宋冬梅,肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异〔J〕. 地理学报,2005,60(2):319 –327.〔Li Xiaoyu,Song Dongmei,Xiao Duning. The variability of groundwater mineralization in Minqin Oasis〔J〕. Acta Geographica Sinica,2005,60(2):319 –327.〕

〔15〕 Sarin M M,Krishnaswami S,Dilli K,et al. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river system:Weathering processes and fluxes to the Bay of Bengal〔J〕. Geochimica et Cosmochimica Acta,1989,53(5):997 –1 009.

〔16〕 Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses〔J〕. Eos,Transactions American Geophysical Union,1944,25(6):914 –928.

〔17〕 Ling H,Zhang Q,Shi W,et al. Runoff variation law and its response to climate change in the headstream area of the Keriya River basin,Xinjiang〔J〕. Journal of Earth Science,2011,22(6):780 –791.

〔18〕 纳麦提·托合提,张峰,师庆东. 克里雅河流域水中氟离子的空间分布特征〔J〕. 干旱区研究,2016,33(5):1 125 –1 131.〔Namat Tohti,Zhang Feng,Shi Qingdong. Spatial distribution of fluorion in water in the Keriya River Basin〔J〕. Arid Zone Re-

search,2016,33(5):1 125 – 1 131.〕

〔19〕 蒲健辰,王平,皇翠兰. 长江江源地区冰川冰、雪、水的化学特征〔J〕. 环境科学,1988,9(4):14 – 19.〔Pu Jianchen, Wang Ping, Huang Cuilan. Chemical characteristics of glacier Ice, snow and water in the headwater of the Yangtze River〔J〕. Environmental Science,1988,9(4):14 – 19.〕

Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Main Ions in Water of the Keriya River, Xinjiang

SHAO Yue-jie[1,2], LUO Guang-ming[3], WANG Jian[4], YAN Wei[4], LIU Jing-shi[1]

(1. *The Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Hotan Bureau of Hydrologic and Water Resources Survey, Hotan* 848000, *Xinjiang, China*;
4. *School of Urban and Planning Sciences, Yancheng Teachers College, Yancheng* 224007, *Jiangsu, China*)

Abstract: In this study, the multi-year data of hydrochemistry, temperature and precipitation in the upper reaches of the Keriya River in 10 consecutive years from 2004 to 2013 and in some years before 1990 were collected. The multivariate correlation statistical method and hydrochemical diagrams were used to discuss the chemical composition and variation characteristics of main ions in water of the Keriya River as well as their affecting factors. The results are as follows: ① The water salinity varied in a range of 203 – 1 081 mg · L^{-1}, and its mean value was 518 mg · L^{-1}. The salinity was higher than the average level of the rivers in the world; ② $Na^+ + K^+$ were the most abundant cations, and the cation concentration was in an order of ($Na^+ + K^+$) > Ca^{2+} > Mg^{2+}. The main anion was dominated by HCO_3^-, and the anion concentration was in an order of HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-; ③ The ion concentration was mainly affected by stream flow in summer, that is, the higher the flow was, the lower the salinity would be. The Keriya River was mainly supplied by surface runoff in raining season but almost by groundwater in dry season. The concentration of ions varied with the change of stream flow due to the different confluence paths in different periods; ④ Weathering of rock was the main source of the ions in water of the Keriya River, especially that of evaporite.

Key words: hydrochemistry; ion concentration; annual change; interannual variation; Principal Component Analysis; Keriya River; Xinjiang